

衝撃吸収最大薄肉断面構造の形状・形態設計法の開発

著者	山崎 光悦
雑誌名	平成6(1994)年度 科学研究費補助金 一般研究(C) 研究成果報告書
巻	1993-1994
ページ	16p.
発行年	1995-03-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/46881

衝撃吸収最大薄肉断面構造の 形状・形態設計法の開発

(研究課題番号 05650076)

平成6年度科学研究費補助金〔一般研究(C)〕研究成果報告書

平成7年3月

研究代表者 山 崎 光 悦

(金沢大学 工学部 教授)

衝撃吸収最大薄肉断面構造の形状・形態設計法の開発

(研究課題番号 0 5 6 5 0 0 7 6)

平成 6 年度科学研究費補助金（一般研究(C)）研究成果報告書

平成 7 年 3 月

研究代表者 山 崎 光 悦
(金沢大学 工学部 教授)

研 究 成 果 目 次

はしがき	1
研究成果	4
1. 研究成果の概要	4
2. 大変形静弾塑性設計感度解析法の開発と薄肉断面構造最適設計への応用	6
2. 1 弾塑性体の設計感度解析法と最適設計への応用	6
2. 2 板殻構造の大変形弾塑性設計感度解析法と構造最適設計への応用	2 1
3. 衝撃大変形弾塑性設計感度解析法の開発と薄肉断面構造最適設計への応用	3 5
3. 1 衝撃荷重下の設計感度解析法と最適設計への応用	3 5
3. 2 板殻構造の衝撃大変形弾塑性設計感度解析法と構造最適化への応用	4 2
4. 効率的な構造最適化のための周辺基礎技術	4 8
4. 1 板殻構造の設計感度解析法と近似法	4 8
4. 2 変厚シェル要素と接合シェル要素	7 7
5. 円筒の衝撃圧潰エネルギー吸収能の実験的検討	9 8
6. 今後の展望	1 0 2

はしがき

自動車の車体構造に代表されるように乗用構造物は、通常走行時には車の各種機能を維持するための強度部材として機能し、事故による衝突時にはその主要部材が圧潰変形することによって衝撃エネルギーを吸収し、他の安全装置と合わせて搭乗者を危険から守るための重要な役割を果たしている。したがって乗用構造物では衝撃エネルギー吸収能を向上させる設計がきわめて重要であるにもかかわらず、衝撃負荷時の荷重をどのように分散させ、また各主要部材はどのような圧潰パターンによってエネルギー吸収すればよいかなど有効な設計手法が欠如しているため、スーパーコンピュータを利用した衝突シミュレーションや衝突実験による現象の予測・確認と試行錯誤的な設計変更を繰返し実施しており、しかも主要な設計が終了した設計全体の最終段階に近い状態でしかシミュレーションや実験を実施することができないため、それらの結果が十分に設計にフィードバックできないのが現状である。

衝突解析問題は大変形、材料非線形、時間応答解析、接触解析を含む複雑な構造解析問題ではあるが、すでに商用コードも普及しつつあり、一部の業種では設計業務にも取り入れられており、問題の関心事は貫通解析、エネルギー吸収解析、最適設計などに移りつつある。したがって、衝突解析法の解析精度に関する議論はあるものの、十分その最適設計問題の基礎解析技術として衝突解析法の応用が可能であると考えられる。

しかし、構造最適化設計法に関する従来の研究は、その大半が静弾性設計問題、振動問題に関するもので、一部の骨組構造を対象としたものを除き衝撃荷重下の最適設計法に関する研究は全く実施されていない。ようやく最近、非線形時間応答解析問題の設計感度解析法が若干発表されている程度で、また衝撃弾性座屈問題の座屈荷重最大化に関する研究は若干見られるものの材料非線形を加味した、あるいはエネルギー吸収に注目した設計感度解析法、最適設計法に関する研究は皆無と言ってよい。

また、薄肉断面部材のエネルギー吸収効果に関する研究は、一部の特定断面部材を対象に過去にも実施され、それなりの知見も得られているが、各種断面のエネルギー吸収効果を系統的に調べた研究もなく、また高速衝突時のエネルギーを効果的に吸収するような薄肉断面構造を実現するための設計技術の確立にはほど遠いのが現状である。

本研究では、薄肉断面部材で構成される骨組と板殻あるいは板殻と板殻の組立構造を対象にその衝撃エネルギー吸収能を最大化するための汎用的な設計法の基礎技術の確立と具体的な部材形状・形態の検討を目的とした。特に、非線形構造の衝撃応答の設計感度解析法とそれを利用した数値計画法による効率的な圧潰エネルギー吸収最大化設計法の確立を目指した。

平成7年3月

研究代表者 山崎 光悦

研究組織

研究代表者	山崎 光悦	(金沢大学工学部 教授)
研究分担者	坂本 二郎	(金沢大学工学部 助手)

研究経費

平成5年度	1, 700 千円
平成6年度	400 千円

研究発表

(1) 学会誌など

- 1) 山崎光悦・中村宗伸, 近似法による補強リブ付板殻構造最小重量設計法の効率化(第1報, 変位・応力制約問題), 日本機械学会論文集(A編), 58巻, 545号, 1992-1.
- 2) J. Oda, K. Yamazaki, J. Sakamoto and J. Abe, Optimum Design of Plate and Shell Structures Using the Variable Thickness Element, Proceedings of the 33rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Material Conference, 1992-4.
- 3) K. Yamazaki, Approximation Method in Structural Optimization, Proceedings of the First Korea-Japan Joint Seminar on Structural Optimization, 1992-5.
- 4) 山崎光悦・中村宗伸, 近似法による補強リブ付板殻構造最小重量設計法の効率化(第2報, 振動・座屈制約問題), 日本機械学会論文集(A編), 58巻, 554号, 1992-10.
- 5) K. Yamazaki and G.N. Vanderplaats, Design Sensitivity Analysis with Isoparametric Shell Elements, Structural Optimization, Vol.5, No.3, 1933-1.
- 6) 山崎光悦・渋谷和弘, 衝撃荷重下の連続体の形状最適化法, 日本機械学会論文集(A編), 59巻, 558号, 1993-2.
- 7) 山崎光悦・坪坂憲昭, 特殊シェル要素による薄板組立構造接合部の応力解析, 日本機械学会論文集(A編), 59巻, 568号, 1993-12.
- 8) 山崎光悦・渋谷和弘, 弾塑性体の設計感度解析法と形状最適化への応用, 日本機械学会論文集(A編), 60巻, 576号, 1994-8.
- 9) 山崎光悦・小林 徹, シェル構造の大変形弾塑性設計感度解析法と構造最適化への応用, 日本機械学会論文集(A編), 60巻, 579号, 1994-11.
- 10) 山崎光悦・坪坂憲昭, 板殻接合補強構造の最小重量設計法, 日本機械学会論文集(A編), 60巻, 580号, 1994-12.
- 11) K. Yamazaki and T. Kobayashi, Sensitivity Analysis of Nonlinear Shell Structures and Its Application to Buckling Constraint Optimization, Proceedings of the 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Material Conference, 1995-4. (発表予定)

- 1 2) K. Yamazaki and N. Tsubosaka, Sensitivity Analysis of Nonlinear Material and Its Application to Shape Optimization, Proceedings of the 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Material Conference, 1995-4. (発表予定)

(2) 口頭発表

- 1) 山崎光悦・小林 徹, シェル構造の大変形弾塑性座屈荷重の設計感度解析法, 日本機械学会第70期通常総会講演会, 八王子, 1993-4.
- 2) K. Yamazaki and K. Shibuya, Shape Optimization Technique under Impact Loading, The 34th AIAA/ASME/ASCE/ASH/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, La Jolla, California(USA), 1993-4.
- 3) 山崎光悦・渋谷和弘, 弾塑性体の設計感度解析と形状最適化, 日本機械学会第3回設計工学・システム部門講演会, 東京, 1993-6.
- 4) 山崎光悦・小林 徹, シェル構造の大変形弾塑性座屈感度解析法と最適設計への応用, 日本機械学会平成5年度材料力学部門講演会, 堺, 1993-11.
- 5) 山崎光悦・坪坂憲昭, シェル接合要素による薄板組立構造接合部の最適設計, 日本機械学会平成5年度材料力学部門講演会, 堺, 1993-11.
- 6) 山崎光悦・坪坂憲昭, 接合要素による薄板組立構造の最適設計, 第17回NCPシンポジウム, 加賀温泉, 1993-12.
- 7) 山崎光悦・小林 徹・川上竜司, スリット入りアルミニウム円筒の衝撃エネルギー吸収能の検討, 日本機械学会北陸信越支部第31期総会講演会, 富山, 1994-3.
- 8) 山崎光悦・大川直勝, シェル構造の弾塑性衝撃応答解析, 日本機械学会北陸信越支部第31期総会講演会, 富山, 1994-3.
- 9) 山崎光悦・坪坂憲昭, 板殻接合補強構造の解析法と最適設計への応用, 日本材料学会第23回FRPシンポジウム, 京都, 1994-3.
- 10) 山崎光悦・坪坂憲昭, 薄板接合組立構造の最適設計, 日本機械学会第4回設計工学・システム部門講演会, 日野, 1994-7.
- 11) 山崎光悦・小林 徹, シェル構造の大変形弾塑性設計感度解析法と構造最適設計への応用, 日本機械学会第4回設計工学・システム部門講演会, 日野, 1994-7.
- 12) 山崎光悦・大川直勝, 板殻構造衝撃弾塑性応答の設計感度解析法, 日本設計工学会全国大会講演会, 金沢, 1994-10.
- 13) 山崎光悦・大川直勝, シェル構造の衝撃大変形弾塑性設計感度解析法, 日本機械学会第7回計算力学講演会, 東京, 1994-11.

研究成果

1. 研究成果の概要

衝撃エネルギー吸収薄肉断面構造の設計法の開発を目指し、以下の研究成果を得た。

(1) 弾塑性体の設計感度解析法と最適設計への応用

連続体を対象として、弾塑性有限要素解析法としてニュートン・ラブソン型の解法を基礎に、直接微分法による設計感度解析法の定式化を行ない、数値例を通して塑性域での変位感度、応力感度の解析法の有効性を確認した。特に、応力－ひずみ関係が二直線近似で与えられる双一次型の構成式の弾性－塑性遷移点で生ずる設計感度の不連続性の取り扱いについて有用な解法を考案した。また提案した設計感度解析法を、連続体の形状最適化問題に応用して有効性を確認した。

(2) 大変形静弾塑性設計感度解析法の開発と薄肉断面構造最適設計への応用

薄板、殻構造の大変形弾塑性有限要素解析法としてニュートン・ラブソン型の解法を基礎に、直接微分法による薄肉断面構造の各種寸法を設計変数とする設計感度解析法の定式化を行ない、解析効率も考慮に入れたプログラムを作成した。また、それを平板、円筒など理論解、近似解の存在する基本的な問題の変形、座屈荷重の設計感度解析を実施して開発した手法の有効性を確認した。さらに、設計感度解析プログラムを基礎に、近似法による座屈制約下の最小重量設計問題を定式化し、逐次二次計画法による部分円筒殻、リブ付き平板などの寸法最適設計を試み、有効性を確認した。

(3) 衝撃荷重下の設計感度解析法と最適設計への応用

ニューマーク法による衝撃応答解析の有限要素法を基礎に、衝撃応答の設計感度解析法を定式化し、数値例題を通して解析精度などを確認した。また変位や応力など時間的に変動する応答に対する制約条件の設定法、その感度解析法を検討し、ピーク応力、時間平均応力などについての有効な制約法を見いだした。さらにその結果を用いて衝撃応答制約下での連続体の形状最適化を実施し、有効な結果を得た。

(4) 衝撃大変形弾塑性設計感度解析法の開発と薄肉断面構造最適設計への応用

薄板、殻構造の大変形衝撃弾塑性応答解析プログラムをニューマーク法とニュートン・ラブソン法による繰返しによる定式化にしたがって作成し、平板、部分円筒殻、箱型薄肉断面はりなど基本モデルに適用して有効性を確認すると共に要素分割と時間ステップ幅の解析精度に及ぼす影響について検討した。また強制変位型衝撃応答解析の荷重－変形関係から吸収エネルギーを算出する方法についても詳しく検討した。次に(2)、(3)で開発した直接微分法による設計感度解析法を衝撃問題に拡張して、大変形衝

撃弾塑性座屈設計感度解析法を定式化し、衝撃エネルギー吸収の設計感度解析法を確立した。9節点アイソパラメトリック・シェル要素による衝撃応答の設計感度解析プログラムを作成し、部分円筒殻、リブ付き平板、薄肉断面はりなどの板厚、諸寸法などを設計変数とする設計感度解析を実施して解法の有効性を確認した。さらに衝撃弾塑性設計感度解析法を用いて、二次計画法による座屈崩壊荷重最大化、吸収エネルギー最大化設計法のプログラムを作成し、円筒の衝撃座屈、リブ付き平板の衝撃座屈問題に応用して、手法の有効性、諸寸法の影響、効果について検討した。

(5) 効率的な構造最適化のための周辺基礎技術 1 (近似法)

衝撃エネルギー吸収最大化設計を実施する上で、實際上重要となる板殻構造の直接微分法による効率的な設計感度解析法を静的問題、座屈問題、振動問題を対象に開発した。また設計感度解析結果をもとに、目的関数や制約関数をテーラー級数展開して近似二次計画問題や近似線形問題を構成して移動制約の下にそれを数値計画法によって解き、逐次最適解に収束させる近似法を開発した。特に、板殻構造や補強リブの諸寸法に対して逆設計変数の有効性・効率の良さを設計例を通して確認した。

(6) 効率的な構造最適化のための周辺基礎技術 2 (変厚シェル要素と接合シェル要素)

板殻構造最適設計の設計自由度を増す有効な方法として板殻の板厚を連続的に変化させる設計法がある。そのための有限要素モデルとして有限要素内で板厚が連続的に変化する場合も取り扱える特殊なシェル要素を考案し、板殻構造の形態設計に応用した。また板殻を面で接合した組立構造の接合部の応力を精度良く解析できる特殊シェル接合要素を考案し、リブ補強された板曲げ問題の最小重量設計に応用して有効性を確認した。今後、圧潰エネルギー吸収最大化設計においてもより精密なモデル化、設計が要求される場合に有効となる。

(7) 薄肉円筒試料によるエネルギー吸収効果の実験的検討

アルミニウム製の円筒試料に一定寸法のスリット列を円周方向に入れたモデルを対象に、スリット間隔、スリット本数などを種々変えたモデルの衝撃圧潰試験を実施して、衝撃吸収エネルギー、座屈パターンとモデルの関係を詳しく検討した。今後、(4)で開発した吸収エネルギー最大化設計法を利用してスリット入り円筒のスリットの効果について詳しく比較・検討し、より実際に近い条件での衝撃圧潰エネルギー吸収最大化設計法の確立を目指す必要がある。

2. 大変形静弾塑性設計感度解析法の開発と薄肉断面構造最適設計への応用

2. 1 弾塑性体の設計感度解析法と最適設計への応用

弾塑性体の最適設計が実用性と限界設計の立場から強く望まれるようになってきている。荷重増分解析あるいは変位増分解析によって連立方程式の解法を繰り返し実施する弾塑性体あるいは弾塑性板殻構造の最適設計を実施するには、最適設計全体に対する構造解析、設計感度解析の比率がどうしても大きくなることからより少ない最適化の繰り返し数で最終解に到達する必要がある。そのためには収束の早い数値計画法の採用、より効率の良い設計感度解析法の確立、最適化効率の高い近似問題の構成法の確立が要求される。

本研究ではまず非線形材料の設計感度解析法、その最適設計への応用法を検討するため連続体を対象として、弾塑性有限要素解析法としてニュートン・ラプソン型の解法を基礎に、直接微分法による設計感度解析法の定式化を行ない、数値例を通して塑性域での変位感度、応力感度の解析精度、解析法の有効性を確認した。特に、応力－ひずみ関係が二直線近似で与えられる双一次型の構成式の弾性－塑性遷移点で生ずる設計感度の不連続性の取り扱いについて有用な解法を考案し、内圧を受ける厚肉円筒、一様負荷を受ける矩形板中の空孔形状最適化問題に応用して有効性を検討した。

ここで得られた成果は、大変形弾塑性板殻構造の設計感度解析、最適設計の基礎理論の一部を構成する。

2. 2 板殻構造の大変形弾塑性設計感度解析法と構造最適設計への応用

次に、2. 1 節の成果をもとに材料非線形と大変形に伴って生ずる幾何学的非線形を同時に加味した大変形静弾塑性問題の設計感度解析法を、板殻構造の有限要素法に対して確立し、材料非線形、幾何学的非線形板殻構造の最適設計に応用することを目的とした。

そこで薄板、殻構造の大変形弾塑性有限要素解析法としてニュートン・ラプソン型の解法を基礎に、直接微分法による薄肉断面構造の各種寸法を設計変数とする設計感度解析法の定式化を行ない、解析効率も考慮に入れたプログラムを作成した。特に、非線形座屈応答の設計感度解析、最適設計が可能となるよう、変位増分型の解法も包含した手法を開発し、数値例による検討を行なった。具体的な数値例として平板、円筒など理論解、近似解の存在する基本的な問題の変形、座屈荷重の設計感度解析を実施して開発した手法の有効性を確認した。さらに、設計感度解析プログラムを基礎に、近似法による座屈制約下の最小重量設計問題を定式化し、逐次二次計画法による部分円筒殻、リブ付き平板などの寸法最適設計を試み、有効性を確認した。

確立した大変形弾塑性板殻構造の設計感度解析法、最適設計法は、薄肉断面構造の衝撃圧潰エネルギー最大化手法の重要な基礎技術を構成する。

3. 衝撃大変形弾塑性設計感度解析法の開発と薄肉断面構造 最適設計への応用

3. 1 衝撃荷重下の設計感度解析法と最適設計への応用

ここでは、衝撃応答の設計感度解析法、最適設計へのその応用を目的として実施した研究成果について示す。ニューマーク法による衝撃応答解析の有限要素法を基礎に、衝撃応答の設計感度解析法を定式化し、数値例題を通して解析精度などを確認した。また変位や応力など時間的に変動する応答に対する制約条件の設定法、その感度解析法を検討し、ピーク応力、時間平均応力などについての有効な制約法を見いだした。さらにその結果を用いて衝撃応答制約下での平板中の空孔形状、エンジン・コネクティング・ロッドの形状最適化を実施し、有効な結果を得た。衝撃応答の設計感度解析法など、ここで得た知見は板殻薄肉断面構造の衝撃応答の設計感度解析などに応用できる。

3. 2 板殻構造の衝撃大変形弾塑性設計感度解析法と 構造最適化への応用

前節までの研究成果をもとに、板殻薄肉断面構造の衝撃圧潰エネルギー吸収最大化設計における設計感度解析法の確立と、具体的な設計手法の開発を試みた。

薄板、殻構造の大変形衝撃弾塑性応答解析プログラムをニューマーク法とニュートン・ラプソン法による繰返しによる定式化にしたがって作成し、平板、部分円筒殻、箱型薄肉断面はりなど基本モデルに適用して有効性を検討した。また要素分割と時間ステップ幅の解析精度に及ぼす影響についても検討を加えた。さらに強制変位型衝撃応答解析の荷重－変形関係から衝撃座屈時の吸収エネルギーを算出する方法についても詳しく検討した。次に2. 2節、3. 1節で開発した直接微分法による設計感度解析法を衝撃問題に拡張して、大変形衝撃弾塑性座屈設計感度解析法を定式化し、衝撃エネルギー吸収の設計感度解析法を確立した。9節点アイソパラメトリック・シェル要素による衝撃応答の設計感度解析プログラムを作成し、部分円筒殻、リブ付き平板、薄肉断面はりなどの板厚、諸寸法などを設計変数とする設計感度解析を実施して解法の有効性を確認した。さらに衝撃弾塑性設計感度解析法を用いて、二次計画法による座屈崩壊荷重最大化、吸収エネルギー最大化設計法のプログラムを作成し、円筒の衝撃座屈、リブ付き平板の衝撃座屈問題に応用して、手法の有効性、諸寸法の影響、効果について検討した。

4. 効率的な構造最適化のための周辺基礎技術

4. 1 板殻構造の設計感度解析法と近似法

衝撃エネルギー吸収最大化設計を実施する上で、實際上重要となる板殻構造の直接微分法による効率的な設計感度解析法を、静的問題、座屈問題、振動問題を対象にアイソパラメトリック要素について開発した。その有効性を平板、円筒など設計感度の理論解の既知なモデルに適用して精度などと共に確認した。また設計感度解析結果をもとに、目的関数や制約関数をテーラー級数展開して近似二次計画問題や近似線形問題を構成し、移動制約の下にそれを数理計画法によって解いて逐次最適解に収束させる近似法を、順変数、逆変数あるいは固有値問題に対してはレイリー商近似などに基づいて開発した。さらにリブ付き平板構造、リブ付き円筒構造などの静的問題、座屈問題、振動問題の寸法最適化に適用して最適化効率を検討し、有効性を確認した。特に、板殻構造や補強リブの諸寸法に対して逆設計変数の有効性・効率の良さを設計例を通して確認した。

以上の結果は、圧潰エネルギー吸収最大化設計などより複雑な設計問題に対しても有効である。

4. 2 変厚シェル要素と接合シェル要素

板殻薄肉断面構造最適設計の設計自由度を増す有効な方法として板殻の板厚を連続的に変化させる設計法がある。そのための有限要素モデルとして有限要素内で板厚が連続的に変化する場合も取り扱える特殊なシェル要素を考案し、板殻構造の形態設計に応用した。また板殻を面で接合した組立構造の接合部の応力を精度良く解析できる特殊シェル接合要素をペナルティ法によって接合条件をエネルギー関数に組み込む手法により考案し、まずその解析精度などを、基本的な組立構造、面接合されたリブ付き等方性平板、リブ付き複合材料積層板などに適用して確認した。次にリブ補強された板曲げ問題の最小重量設計問題に開発した特殊接合シェル要素を応用して、より解析精度の良い応力制約下の最適設計が実施できることを確認した。今後、圧潰エネルギー吸収最大化設計においても溶接などで接合された複雑な組立薄肉断面構造などのより精密なモデル化、設計が要求される場合に有効となる。

5. アルミニウム円筒の衝撃圧潰エネルギー吸収能の実験的検討

アルミニウム製の円筒試料に一定寸法のスリット列を円周方向に入れたモデルを対象に、スリット間隔、スリット本数などを種々変えたモデルの衝撃圧潰試験を実施して、衝撃吸収エネルギー、座屈パターンとモデルの関係を詳しく検討した。詳細は次頁以降に示すが、振り子式の衝撃試験機を製作し、衝突前後の二つの振り子の振り上がり角と圧潰後の円筒試料の飛び出し速度から吸収エネルギーを算出した。また、圧潰後に試料の塑性ヒンジの準静的な塑性仕事から算出した吸収エネルギーとを比較して吸収効果についても検討した。今後、3章で開発した吸収エネルギー最大化設計法を利用してスリット入り円筒のスリットの効果、さらには他の形状の薄肉断面構造についてのエネルギー吸収効果や衝突速度と圧潰モード、エネルギー吸収量の関係など系統的に詳しく比較・検討し、より実際に近い条件での衝撃圧潰エネルギー吸収最大化設計法の確立を目指す必要がある。

6. 今後の展望

以上、本研究で得られた研究成果について述べた。当初、計画した薄肉断面板殻構造の衝撃圧潰エネルギー吸収の最大化汎用設計法を確立し、具体的な部材形状・形態の検討を目的としたが、後半の具体的な形状・形態の検討は十分には実施できなかった。

今後、次のような観点からのさらなる研究が必要である。

- (1) 衝撃圧潰現象は、塑性座屈に伴う接触過程を含む複雑な変形挙動であるため、衝撃接触問題の定式化に従った設計感度解析法の開発、吸収エネルギー感度の検討など、圧潰の全過程を対象とする最適設計法の確立が必要である。
- (2) 薄肉断面構造のエネルギー吸収最大化設計には、局所的な衝撃負荷によるエネルギーが組立構造全体へ分散される効果と、薄肉断面主要部材の圧潰により吸収される効果によって、衝撃力の緩衝が達成されとする観点から2段階最適化法を検討する必要化ある。
- (3) 現在のコンピュータの能力では1回の衝突解析すら膨大な計算時間と容量を必要とし、ましてや全体構造の衝突解析を直接何回も繰り返す構造最適設計法を実施することは現状ではスーパーコンピュータを利用する以外は不可能に近い。そこで非線形ばね-質量系による衝撃簡略解析法と部材レベルでの詳細衝突解析を組み合わせ最適化するため、各部材に対する詳細な衝撃圧潰解析の全体変形とエネルギー吸収挙動をもとに、薄肉断面部材を1つまたは複数の非線形ばね-質量-ダンパー系に置換した全体構造衝突解析の簡略モデルを検討する必要がある。またそのモデルのばね定数、質量、減衰係数と具体的な部材の設計変数との比例関係、相似関係なども検討し、総合的なエネルギー吸収能最大化簡易設計手法を確立する必要がある。

以上のような観点からの研究をさらに積み重ね、衝突エネルギー吸収最大化設計法が実用的なレベルで確立すれば、構造最適設計法を用いて設計の初期の段階で車体主要構造の衝突エネルギー吸収効果を検討したり、適切な断面寸法、構造形態などが決定でき、設計コストの削減や設計期間の短縮のみならず幅広い観点からより理想的で安全な構造形態の設計の検討が可能となり、高速走行時の衝突事故でも搭乗者がほとんど負傷しないような自動車車体構造の実現も不可能ではないと期待できる。本研究で開発を目指した設計手法は決して応用範囲の広いものではないが、自動車を人間が直接操作するかぎり、衝突事故は将来にわたって無くすることは難しく、したがって自動車など乗用構造物の安全性を大幅に向上させる上できわめて重要な技術となり得ると考えられる。